

Janusz Petryna, Maciej Sułowicz, Arkadiusz Duda, Politechnika Krakowska, Kraków
 Zbigniew Ławrowski, Energotest-Diagnostyka Sp. z o.o., Brzezie k. Opola
 Krzysztof Guziec, SENCO Sp. z o.o., Kraków

BEZKONTAKTOWE WYZNACZANIE MOMENTU OBCIĄŻENIA SILNIKA INDUKCYJNEGO NA STANOWISKU PRACY W ENERGETYCE W OPARCIU O POMIAR STRUMIENIA POOSIOWEGO

CONTACTLESS DETERMINATION OF AN INDUCTION MOTOR LOAD TORQUE BASED ON THE AXIAL FLUX MEASUREMENT AT A WORKPLACE IN POWER INDUSTRY

Streszczenie: W pracy przedstawiono metodę wyznaczania momentu obciążenia silnika indukcyjnego opartą na pomiarze strumienia poosiowego. Pomiar wykonano na stanowisku pracy silnika w elektrowni, zaś w stacji prób podczas obciążania uzyskano charakterystyki ilustrujące zależności momentu od strumienia i od prędkości obrotowej. Zaproponowano sposób wykorzystania pojedynczego pomiaru do oszacowania momentu. Proponowana metoda jest stosunkowo prosta do realizacji i pozwala na w pełni bezinwazyjne wyznaczanie momentu obciążenia silników indukcyjnych. Po zautomatyzowaniu pomiarów może ona zostać wykorzystana w systemach monitoringu stanu maszyny działających on-line.

Abstract: The paper presents a method for determining the load torque of an induction motor based on the measurement of axial flux. The measurement was carried out at the motor workplace in the power plant, while in the test station, during the loading, characteristics illustrating the dependence of the torque on the axial flux and on the rotational speed were obtained. A way of using a single measurement to estimate the torque has been proposed. The method is relatively simple to implement and allows for a fully non-invasive determination of the load torque. After automating the measurements, it can be used in on-line machine monitoring systems.

Słowa kluczowe: silnik indukcyjny, pomiar bezkontaktowy, strumień poosiowy, widma strumienia poosiowego, moment elektromagnetyczny, moment obciążenia, stacja prób

Keywords: induction motor, contactless measurement, axial flux, flux spectra, electromagnetic torque, load torque, testing station

1. Wstęp

Problematyka wykorzystania strumienia poosiowego maszyn prądu przemiennego w diagnostyce i eksploatacji jest od dawna obecna w badaniach i publikacjach [1-8]. Od pewnego czasu obserwuje się także zainteresowanie tą tematyką ze strony przemysłu [9]. Autorzy tego opracowania również zajmują się nią od paru lat [8-9], [11-13]. Wyniki obliczeń polowych [11-12] stały się zachętą do zbadania możliwości wyznaczania obciążenia silnika poprzez pomiar strumienia przy użyciu cewki o prostej budowie.

2. Pomiar na stanowisku pracy w elektrowni

Obiektem badań był silnik pompy wody Sg250 M2 ($P_n=55$ kW, $n_n=2970$ obr/min, $U_n=380/660$ V Δ). W stanie ustalonym na sta-

nowisku pracy zarejestrowano przebiegi czasowe napięcia na wyjściu cewki pomiarowej umieszczonej od strony wentylatora (Rys.1), prądów fazowych przy użyciu cewek Rogowskiego oraz napięć międzyfazowych z wykorzystaniem sond napięciowych. W oparciu o te pomiary wyznaczono punkt pracy maszyny: moc, obroty i moment elektromagnetyczny wg formuł:

$$T=9.55P_{\Psi} (1-s)/n =9.55 P_{\Psi} /n_0 \quad (1)$$

gdzie:

$$P_{\Psi} = P_1 - 3R_s I_s^2 \quad (2)$$

P_1 – moc pobierana z sieci jako wartość średnia mocy chwilowej równej sumie $\sum U(t) I(t)$,
 n - obroty wirnika,
 n_0 - obroty synchroniczne.



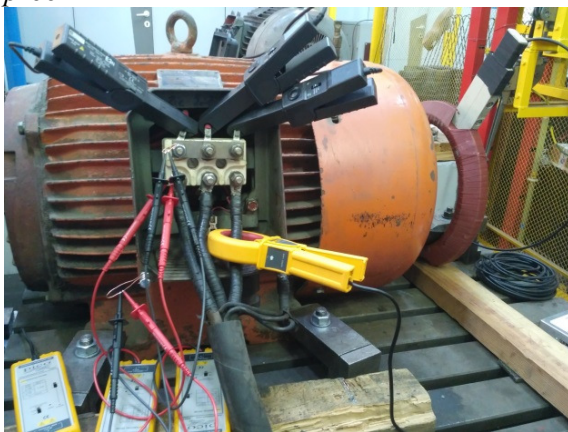
Rys. 1. Sposób pomiaru strumienia poosiowego na stanowisku pracy – cewka na statywie

3. Pomiar na stacji prób

Badany silnik został następnie umieszczony na stanowisku testów w stacji prób, gdzie wykonano pomiary obciążeniowe maszyny z jednoczesnym pomiarem napięcia True RMS: pochodnej strumienia poosiowego, prądów i napięć fazowych, rejestrowanych przy użyciu karty pomiarowej i niezależnie multimetru UT71D jak pokazano na Rys. 2 i 3.

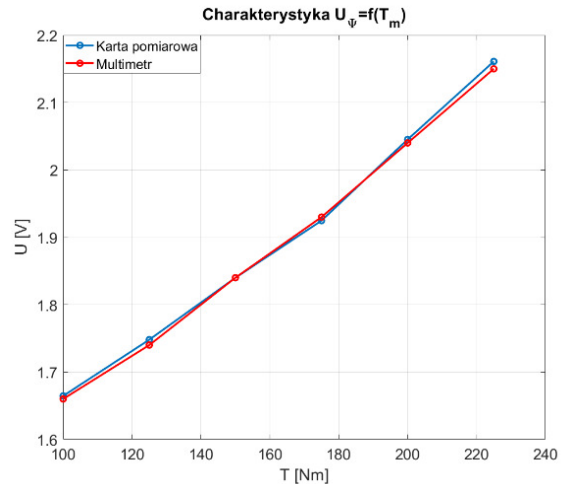


Rys. 2. Silnik obciążony na stanowisku w stacji prób



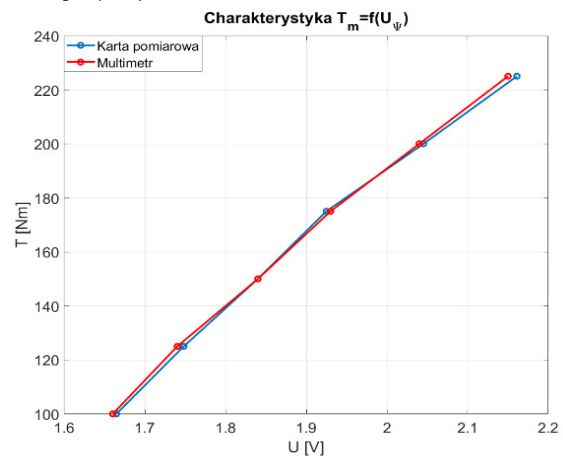
Rys. 3. Silnik na stanowisku w stacji prób - rejestracje prądów, napięć i strumienia

W rezultacie otrzymano charakterystykę napięcia skutecznego True RMS z cewki pomiarowej $U_{\psi} = f(T_m)$ przedstawioną na Rys.4 w zakresie obciążenia silnika od 57% do ponad 120% momentu znamionowego.



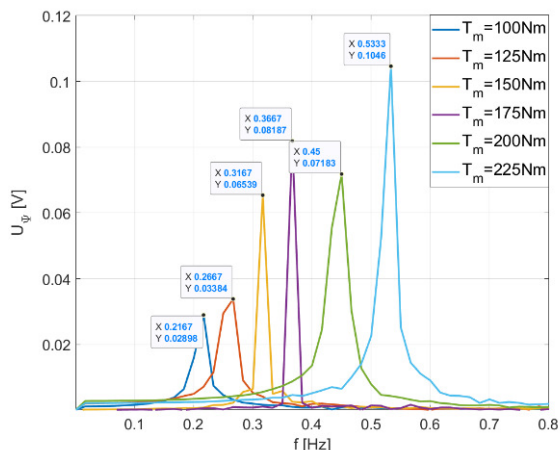
Rys. 4. Napięcie skuteczne od strumienia poosiowego w funkcji momentu obciążenia

Już na tym etapie na podstawie wartości skutecznej napięcia można odczytać aktualny moment obciążenia. Z kolei na Rys.5 przedstawiono odwróconą charakterystykę $T_m = f'(U_{\psi})$.



Rys. 5. Moment obciążenia w funkcji napięcia skutecznego od strumienia poosiowego

Idąc dalej, w oparciu o napięcie od strumienia można z dużą dokładnością wyliczyć obroty badanego silnika. Widmo strumienia zawiera bowiem co najmniej 3 składowe, niosące informacje o prędkości obrotowej, na przykład składowa sf_0 (s – poślizg wirnika). Na Rys.6 zamieszczono właśnie składowe sf_0 odczytane z widm przy różnych obciążeniach badanego silnika.

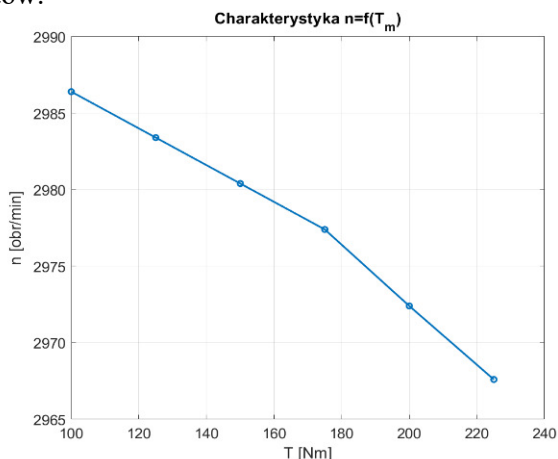


Rys. 6. Składowe s_{f_0} strumienia poosiowego dla różnych obciążeń w funkcji częstotliwości

Z tych wartości otrzymuje się obroty wg formuły:

$$n = n_0 (1-s) \quad (3)$$

oraz wykres $n=f(T_m)$ jak na Rys.7, z którego już można odczytać moment dla danych obrotów.



Rys. 7. Obroty silnika w funkcji momentu obciążenia

Uzyskane pomiarowo charakterystyki $U_\psi=f(T_m)$, $T_m=f^1(U_\psi)$ oraz $n=f(T_m)$ i $T_m=f^1(n)$ uzasadniają tytułową metodę bezkontaktowego wyznaczenia momentu obciążenia w oparciu o pomiar strumienia i wynikających z niego obrotów.

Odczyt momentu obciążenia można zrealizować w jeszcze łatwiejszy sposób. Aby uzyskać ze strumienia informację o obrotach, niekoniecznie trzeba poszukiwać odpowiednich składowych w widmach. Autorzy dysponują bowiem układem pomiarowym, który sygnał napięciowy z cewki przetwarza bezpośrednio na obroty. W ten wygodny sposób można z charakterystyki $n=f(T_m)$ lub $T_m=f(n)$ na pod-

stawie wyświetlanych aktualnych obrotów odczytywać odpowiadające im wartości momentu.

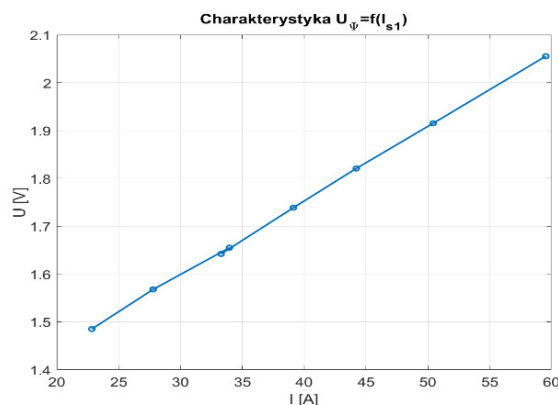
Czy dla każdego silnika jest konieczne wykonanie badań w stacji prób mających na celu uzyskanie charakterystyk $T_m=f(n)$ lub $T_m=f(U_\psi)$?

Tak byłoby najlepiej, lecz w praktyce nie jest to możliwe nawet dla najważniejszych maszyn bloku. Natomiast w oparciu o dwa punkty pracy silnika na instalacji w elektrowni - jeden zmierzony, a drugi obliczony w zakresie typowych obciążeń - można uzyskać bardzo zbliżoną do rzeczywistej charakterystykę, która umożliwi odczyt momentu z całkiem dobrą dokładnością.

W przypadku dosyć stromej charakterystyki $T_m=f(n)$ zmierzony punkt pracy silnika na instalacji to $n=2983.4$ obr/min i $T=124.51$ Nm, zatem moc obciążenia to $P=40.5$ kW. Jest to akurat drugi punkt na charakterystyce $n=f(T_m)$ z Rys.7. Obliczając obroty dla obciążenia na przykład 150 Nm (trzeci punkt na wykresie) otrzymuje się $n=2978$ obr/min, czyli o 2 obroty mniej niż na charakterystyce. Skutkuje to odczytem momentu o wartości 140 Nm, zatem błąd wynosi -6.6%. Obliczając obroty dla obciążenia na przykład 200 Nm (piąty punkt na charakterystyce) otrzymuje się $n=2970$ obr/min, czyli o 2.5 obrotów mniej, niż na charakterystyce. Skutkuje to odczytem momentu o wartości 212 Nm, zatem błąd wynosi +6%.

Znacznie lepszą dokładność można uzyskać na podstawie zależności $T_m=f(U_\psi)$, ponieważ jest ona mniej stroma.

Dla obliczenia drugiego punktu charakterystyki należy wówczas wykorzystać relację pomiędzy napięciem U_ψ a zmierzonym prądem fazowym I_s jak na Rys.8 oraz pomiędzy prądem, a momentem.



Rys. 8. Napięcie od strumienia poosiowego w funkcji prądu silnika

4. Wnioski

Przedstawione wyniki badań zdaniem autorów zachęcają do podjęcia dalszych, bardziej zaawansowanych prac w kierunku bezkontaktowego wyznaczania obciążeń silników indukcyjnych. Jednym z możliwych rozwiązań byłby system on-line umożliwiający po wprowadzeniu podstawowych danych silnika wygenerowanie aktualnej wartości momentu obciążenia z akceptowalną dokładnością na podstawie jednorazowego pomiaru strumienia.

5. Literatura

- [1]. W. Jarzyna "Diagnostic characteristics of Axial Flux in an Induction Motor", *Seventh International Conference on Electrical Machines and Drives*, 1995 (Conf. Publ. No. 412), str.141-146.
- [2]. D.G. Dorrell, W.T. Thomson, S. Roach "Analysis of airgap flux, current, and vibration signals as a function of the combination of static and dynamic air-gap eccentricity in 3-phase induction motors", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1997, 33(1), str. 24-34.
- [3]. V. Kokko "Condition monitoring of squirrel-cage motors by axial magnetic flux measurements", Academic Dissertation, University of Oulu, 2003, Finland.
- [4]. L. Gołębiowski, M. Gołębiowski, M. Noga, J. Skwarczynski "Axial flow in 3D FEM model of induction machine", *Elektrotechnika i Elektronika*, Vol. 25, No. 2, str. 147-152, 2006.
- [5]. K. Chmelík, J. Foldyna, S. Mišák "Magnetické pole v okolí asynchronního stroje, jeho zjišťování a využití", *Electroscope*, č. 2. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, 2007.
- [6]. A. Bobon "3D Finite Element Computation of Axial Flux in Induction Motor", *Transactions on Electrical Engineering*, vol. 1 (2012), No. 3 A247, str. 72-75.
- [7]. W. Pietrowski "Wavelet analysis of axial flux in an induction machine on no-load test", *Electrical Review*, Vol. 88, No. 7b/2012, str. 20-23, 2012.
- [8]. J. Tulicki, J. Petryna, M. Sułowicz "Fault diagnosis of induction motors in selected working conditions based on axial flux signals", *Technical Transactions*, Issue: 13. Electrical Engineering, Issue: 3-E, str. 99-113, 2016.
- [9]. Z. Ławrowski, A. Duda, J. Petryna, M. Sułowicz "Wyznaczanie momentu obciążenia silnika indukcyjnego w oparciu o pomiar strumienia poosiowego", *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 110, wyd. BOBRME Komel, str. 1-8, 2016.
- [10]. P. Ewert "Use of Axial Flux in the Detection of Electrical Faults in Induction Motors", *IEEE Inter-*

national Symposium on Electrical Machines (SME), 2017, str. 1-6.

[11]. J. Tulicki, M. Sułowicz, J. Petryna "Application of the 2D field model to determine the axial flux signal for the purpose of diagnosing induction motors," *2017 18th International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering (ISEF) Book of Abstracts*, Lodz, 2017, pp. 1-2.

[12]. J. Petryna, J. Tulicki, M. Sułowicz "Calculating an electromechanical torque of a squirrel cage motor based on an axial flux obtained by the FEM", *II International Conference of Computational Methods in Engineering Science (CMES'17)*, 2017, ITM Web Conf., Volume 15, str. 1-8, 2017.

[13]. M. Sułowicz, J. Tulicki, J. Petryna, A. Duda "Wpływ uszkodzeń silnika indukcyjnego na dokładność bezkontaktowego wyznaczania momentu elektromagnetycznego z sygnału strumienia poosiowego", *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 119, wyd. BOBRME Komel, str. 197-203, 2018.

Autorzy

dr inż. J. Petryna, jpetryna@pk.edu.pl
 dr inż. M. Sułowicz, msulowicz@pk.edu.pl
 dr inż. A. Duda, aduda@pk.edu.pl
 Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej, Instytut Elektromechanicznych Przemian Energii, 31-155 Kraków, ul. Warszawska 24
 dr inż. Zbigniew Ławrowski, z.lawrowski@energotest-diagnostics.pl
 Energotest-Diagnostyka Sp. z o.o.
 Brzezie k. Opola, 46-021 Brzezie
 mgr inż. K. Guziec, office@senco.krakow.pl
 SENCO Sp. z o.o., 30-716 Kraków,
 ul. Albatrosów 10a

Informacje dodatkowe

Badania, których wynikiem jest niniejsza praca zostały sfinansowane po części przez firmy Energotest-Diagnostyka Sp. z o.o. i SENCO Sp. z o.o. oraz w ramach umowy TME 4690/2018 z PGE Górnictwo i Energetyka Konwencjonalna S.A. jak również po części w ramach tematu badawczego działalności statutowej E-2/568/2018/DS, z dotacji na naukę przyznanej przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.